

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.180601

下垂控制对直流电网动态电压稳定性的影响分析

吴蒙¹, 贺之渊², 阎发友³, 吴亚楠², 杨杰², 周啸²

(1. 国网辽宁省电力有限公司电力科学研究院, 辽宁 沈阳 110006; 2. 全球能源互联网研究院有限公司, 北京 102200; 3. 西南大学工程技术学院, 重庆 400715)

摘要: 直流电网的协调控制策略包括主从控制、直流电压裕度控制及直流电压下垂控制等。下垂控制可以实现直流电网的多点直流电压控制, 但下垂系数的大小会对系统直流侧电压的稳定性产生一定的影响。以基于模块化多电平换流器(Modular Multilevel Converter, MMC)的直流电网为研究对象, 首先建立了下垂控制作用下 MMC 直流电压控制系统模型及其传递函数, 并在此基础上, 采用劳斯判据得到了能够保持系统直流电压稳定的下垂系数取值范围。然后, 分别在时域和频域中分析了在不同取值区间内选取下垂系数对系统直流侧电压控制特性和稳定性的影响。最后, 在 PSCAD/EMTDC 中建立了基于 MMC 的 4 端直流电网仿真模型, 验证了理论分析的正确性, 为工程应用时合理选择下垂系数提供了理论依据。

关键词: 直流电网; 模块化多电平换流器; 下垂控制; 电压稳定性

Influence of droop control on the dynamic voltage stability of DC grid analysis

WU Meng¹, HE Zhiyuan², YAN Fayou³, WU Yanan², YANG Jie², ZHOU Xiao²

(1. State Grid Liaoning Electric Power Company Limited Electric Power Research Institute, Shenyang 110006, China; 2. Global Energy Interconnection Research Institute Co. Ltd, Beijing 102200, China; 3. CET-College of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: Coordinating control strategies of DC grids include master slave control, voltage margin control and voltage droop control, etc. Droop control could achieve distributed voltage control of DC grid, but the droop coefficients would influence the stability of the system. A Modular Multilevel Converters (MMCs) based DC grid is investigated. First, the mathematical model of the MMCs with droop control and its transfer functions are derived. Then, a reasonable value range of droop coefficients that would maintain the system stability is presented by the Routh criterion. The influences of selection of droop coefficients in different ranges on voltage stability are analyzed in time domain and frequency domain respectively. Finally, a four-terminal MMCs based DC grid model is established in PSCAD/EMTDC. The simulation results verify the correctness of the theoretical analysis, and the analysis method will provide a theoretical basis of droop coefficients selection for DC grid applications.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0900900).

Key words: DC grid; modular multilevel converters (MMCs); droop control; voltage stability

0 引言

随着化石能源的日渐枯竭和环境问题的日益突出, 可再生能源的大规模并网已成为电网发展的一个趋势^[1], 传统的电力装备、电网结构和运行技术等在接受大规模间歇式能源方面已显得愈发力不从

心, 而直流电网的建设与应用能够有效地提高电网对可再生能源的消纳能力^[2-4]。

早在 2008 年, ABB 和西门子等就已联合欧洲的相关科研单位共同提出了建设网络化的直流输电, 即欧洲超级电网(Super Grid)的设想^[5], 直流电网的思想由此而来。国际大电网会议(CIGRE) B4-52 “HVDC Grid Feasibility Study” 工作组报告中给出的直流电网定义是: 换流器直流端互联所构成的网格化结构电网^[6]。2002 年, 德国学者 R.Marquardt

基金项目: 国家重点研发计划资助(2016YFB0900900); 西南大学博士科研启动基金项目资助(SWU118053)

和 A.Lesnkar 提出了模块化多电平换流器(Modular Multilevel Converter, MMC)^[7], 其采用模块化设计, 扩展性较好^[8-9], 在高压直流输电领域得到了广泛的关注和应用。因此, 本文将针对基于 MMC 的直流电网开展研究分析。

直流电压是直流电网功率平衡的指标, 直流电网的功率出现不平衡将导致系统电压出现偏差, 当系统的功率出现较大扰动时, 直流电压将严重偏离额定值, 影响系统的安全稳定运行^[10-13]。因此, 协调控制直流电网的直流电压令其保持稳定对系统的功率平衡和稳定运行至关重要。下垂控制可实现直流电网多点直流电压控制, 利用给定的换流站功率与直流电压间的斜率关系实现多个换流站共同承担直流电压的控制^[14-15]。但是这种控制策略严格按照预先设定的下垂曲线调节换流站的功率, 难以做到对单个换流站功率的准确控制, 并且下垂系数的选取较为复杂。针对此问题, 文献[16]分析了换流站退出运行后功率分配与直流电压偏差之间的关系, 并提出了一种优化方法, 在换流站退出运行后直流电压偏差的限制与功率的分配之间进行折衷。文献[17]基于有功传输的优化提出了新的下垂控制器设计方法, 能够在直流系统传输最大有功功率的同时确保每个换流站的电压都不会超过其设计极限值。文献[18]则引入了一个公共直流参考电压, 并在此基础上改进了传统的直流电压下垂控制以使各换流站能够更好地跟踪其指令值。不过, 以上文献均没有研究下垂系数的取值与直流电网动态电压稳定性之间的关系。文献[19]建立了基于下垂控制方式的多端柔性直流输电小信号模型, 并验证了整个交直流系统的稳定性。文献[20]结合平移下垂曲线和改变下垂曲线斜率, 提出了一种新型直流电压协调控制策略, 并分别分析了下垂曲线平移特性参数和下垂曲线斜率参数对系统稳定运行的影响。以上两篇文献在时域下分析了下垂系数对系统稳定性的影响, 但是均没有考虑采用频域分析法, 而作为一种常用的分析系统动态特性的方法, 频域分析法不必直接求解系统的微分方程, 能够更加方便地显示出系统参数对系统性能的影响。

本文首先将建立下垂控制作用下 MMC 的直流侧电压控制系统模型和其传递函数; 随后采用劳斯判据从理论上得到能够保持系统直流电压稳定的下垂系数取值范围, 并分别在时域和频域中分析不同取值区间的下垂系数对 MMC 直流侧电压稳定性的影响; 最后, 在 PSCAD/EMTDC 中对所提出的结论进行仿真验证, 验证所提下垂系数取值范围计算方法的有效性。

1 下垂控制作用下 MMC 直流电压控制系统模型

1.1 MMC 直流侧电压动态特性

MMC 及其子模块(Sub Module, SM)拓扑结构如图 1 所示, 它由三相六个桥臂组成, 上下两个桥臂构成一个相单元^[21-22]。其中, 每个桥臂由若干个相互连接且结构相同的子模块与一个电抗器串联组成。子模块则由 IGBT 与反并联二极管以及直流储能电容构成。

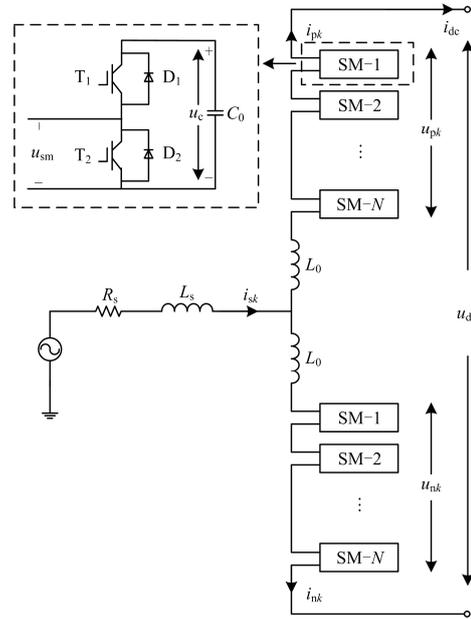


图 1 MMC 基本拓扑单相示意图

Fig. 1 Single-phase diagram of MMC topology

MMC 在正常运行时, 为了维持直流侧电压的稳定, 每个相单元中都需要投入 N 个子模块, 通过上下桥臂的子模块电容电压和电抗器端电压支撑换流器的直流侧电压^[23], 即

$$u_{dc} = u_{pk} + u_{nk} + L_0 \frac{d(i_{nk} - i_{pk})}{dt} \quad (1)$$

式中: u_{pk} 、 u_{nk} 分别为 k 相($k=a,b,c$)上下桥臂电压; i_{pk} 、 i_{nk} 分别为 k 相上下桥臂电流; L_0 为桥臂电感。

由于 MMC 的拓扑具有三相对称性, 可以近似认为直流电流在三个相单元中平均分配。同时, 由于每个相单元的上下桥臂电抗器电感相同, 可以近似认为交流侧相电流在上下桥臂间平均分配, 因此, 得到 k 相上下桥臂电流如式(2)所示。

$$\begin{cases} i_{pk} = \frac{i_{sk}}{2} + \frac{i_{dc}}{3} \\ i_{nk} = \frac{i_{sk}}{2} - \frac{i_{dc}}{3} \end{cases} \quad (2)$$

式中: i_{sk} 为交流侧相电流; i_{dc} 为直流侧电流。

MMC 的 k 相上下桥臂电压由其投入的子模块输出电压叠加得到, 即

$$\begin{cases} u_{pk} = \sum_{i=1}^N M_{pki} u_{smpki} \\ u_{nk} = \sum_{i=1}^N M_{nki} u_{smnki} \end{cases} \quad (3)$$

式中: M_{pki} 和 M_{nki} 分别为上下桥臂的子模块开关函数, 其值为 1 时, 表示子模块处于投入状态, 其值为 0 时, 表示子模块处于切除状态; u_{smpki} 和 u_{smnki} 分别为上下桥臂第 i 个子模块的输出电压。

将式(2)和式(3)代入式(1)可以得到

$$u_{dc} = \sum_{i=1}^N (M_{pki} u_{smpki} + M_{nki} u_{smnki}) - \frac{2L_0}{3} \frac{di_{dc}}{dt} \quad (4)$$

由式(4)可以看出, MMC 直流侧电压的动态特性由上下桥臂的电感、子模块输出电压以及直流侧电流决定。

对于式(4), 进一步考虑子模块输出电压与其电容电压电流之间的关系, 并将其变换到 $d-q$ 坐标系中, 可以得到 MMC 的直流侧电压动态特性满足式(5)^[24]。

$$u_{dc} = Nu_c^0 + \frac{N}{6C_0} \int_0^t \left(\frac{3}{4} i_{sd} - i_{dc} \right) dt - \frac{2L_0}{3} \frac{di_{dc}}{dt} \quad (5)$$

式中: C 为子模块电容; u_c^0 为 MMC 子模块初始电压, 其参考方向与 u_c 相同; i_{sd} 为交流电流在 d 轴上的分量。由式(5)可以得到 MMC 的直流侧电压动态特性模型如图 2 所示。

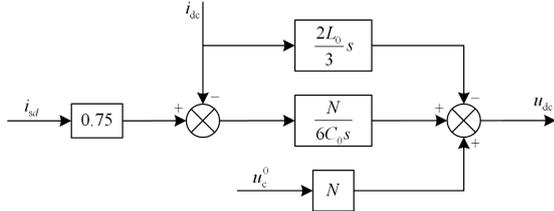


图 2 MMC 直流侧电压动态特性模型

Fig. 2 DC voltage dynamic characteristic model of MMC

1.2 下垂控制策略

当换流站采用下垂控制时, 下垂控制器结构如

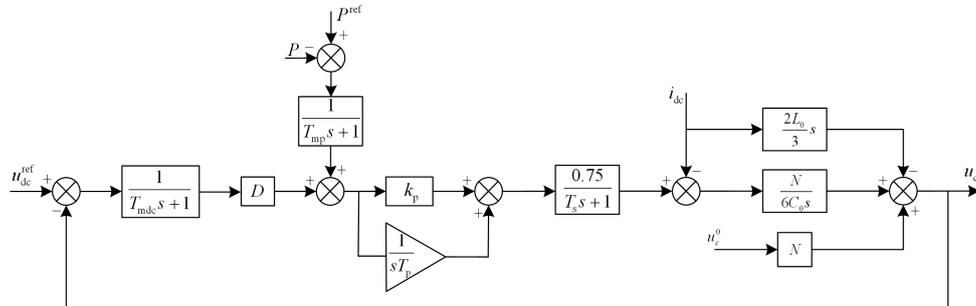


图 4 下垂控制作用下 MMC 直流电压控制系统模型

Fig. 4 DC voltage control system model of MMC with droop control

图 3 所示^[25], 其中: u_{dc} 、 u_{dc}^{ref} 分别为换流站直流侧电压的测量值和参考值; P 、 P^{ref} 分别为换流站交流侧有功功率的测量值和参考值; D 为下垂系数; e 为下垂控制输出的误差信号, 其表达式为

$$e = D(u_{dc}^{ref} - u_{dc}) + P^{ref} - P \quad (6)$$

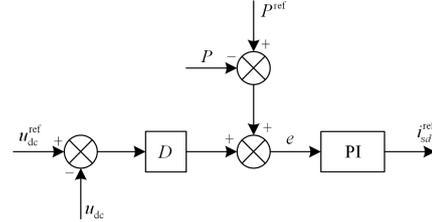


图 3 下垂控制器结构

Fig. 3 Structure of droop control

稳态情况下, 下垂控制输出误差信号应满足 $e=0$, 由此可得直流电压和换流站交流侧有功功率间的关系式为

$$u_{dc} = u_{dc}^{ref} + \frac{P^{ref} - P}{D} \quad (7)$$

结合 MMC 直流侧电压动态特性模型和下垂控制控制器结构, 可得到下垂控制作用下 MMC 直流电压控制系统模型, 如图 4 所示。其中引入了三个一阶延时环节, 用以等效测量及计算 dq 轴电流的时间。各延时环节分别为 MMC 直流侧电压测量等效环节 T_{mdc} , 功率测量等效环节 T_{mp} 以及电网交流电流等效环节 T_s ; k_p 为比例系数; T_p 为积分环节时间常数。

2 下垂系数对 MMC 电压稳定性的影响

2.1 下垂系数对 MMC 电压稳定性影响时域分析

对于图 4 所示的系统模型, 可将功率控制输入和直流电流输入看作扰动量, 此时, 下垂控制作用下 MMC 直流电压控制系统的开环传递函数和闭环传递函数分别如式(8)和式(9)所示。

$$G(s) = \frac{ND(k_p T_p s + 1)}{8s^2(T_{mdc}s + 1)(T_s s + 1)T_p C_0} \quad (8)$$

$$H(s) = \frac{ND(k_p T_p s + 1)}{\left[8s^2(T_{mdc}s + 1)(T_s s + 1)T_p C_0 + ND(k_p T_p s + 1) \right]} \quad (9)$$

由式(9)可得系统的闭环特征方程为

$$8T_p T_{mdc} T_s C_0 s^4 + 8T_p (T_{mdc} + T_s) C_0 s^3 + 8T_p C_0 s^2 + NDk_p T_p s + ND = 0 \quad (10)$$

根据劳斯判据, 式(10)的稳定判据为

$$\begin{cases} 8T_p T_{mdc} T_s C_0 > 0 \\ 8T_p (T_{mdc} + T_s) C_0 > 0 \\ \frac{8T_p (T_{mdc} + T_s) C_0 - NDk_p T_{mdc} T_s T_p}{T_{mdc} + T_s} > 0 \\ \frac{NDk_p T_p - 8ND(T_{mdc} + T_s)^2 T_p C_0}{8(T_{mdc} + T_s) T_p C_0 - NDk_p T_{mdc} T_s T_p} > 0 \\ ND > 0 \end{cases} \quad (11)$$

由式(11)可得下垂系数的取值范围为

$$0 < D < \frac{8k_p (T_{mdc} + T_s) T_p C_0 - 8(T_{mdc} + T_s)^2 C_0}{Nk_p^2 T_{mdc} T_s T_p} \quad (12)$$

以容量为 1 500 MVA 的 MMC 系统为例, 其主电路参数、下垂控制环节参数如表 1 所示。

表 1 MMC 电气及主电路部分参数

Table 1 Part parameters of MMC main circuit

参数名称	参数
额定容量 S_N/MVA	1 500
额定直流电压 U_{DC}/kV	± 500
联结变压器变比 (kV/kV)	525/500
联结变压器漏抗 $X_l/\text{p.u.}$	0.15
桥臂电抗 L_0/mH	100
桥臂等效电阻 R_0/Ω	1
子模块电容器 C_0/mF	0.8
单桥臂子模块数 N	54
直流电压等效环节时间常数 T_{mdc}/s	0.002
交流电流等效环节时间常数 T_s/s	0.002
PI 控制器比例环节放大倍数 k_p	8
PI 控制器积分环节时间常数 T_p/s	0.01

将上述参数代入式(12)可以得到下垂系数的取值为

$$0 < D < 14 \quad (13)$$

由闭环特征方程, 可画出其根轨迹图, 如图 5 所示。

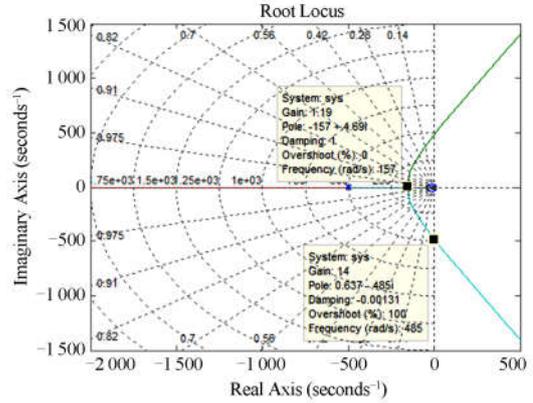


图 5 直流电压控制系统根轨迹图

Fig. 5 Root locus of DC voltage control system

闭环系统的稳定性可通过观察闭环极点在复平面的位置来判断, 由图 5 可知, 当 $0 < D < 14$ 时, 所有闭环极点均位于复平面的左半平面, 说明闭环系统能够稳定; 当下垂系数大于 14 时, 控制系统处于负阻尼状态, 系统将无法保持稳定, 与式(13)的结论吻合。

进一步分析不同取值区间的下垂系数对 MMC 直流侧电压稳定性的影响。可以看到根轨迹上存在一个分离点, 此处对应的下垂系数为 $D=1.19$ 。由自动控制原理可知^[26]: 当 $0 < D < 1.19$ 时, 直流电压控制系统处于过阻尼状态, MMC 直流侧的输出电压呈非周期的单调过程, 系统的动态稳定性较好; 当 $1.19 < D < 14$ 时, 直流电压控制系统处于欠阻尼状态, 直流侧的输出电压呈衰减振荡过程, 系统的动态稳定性相对较差。

2.2 下垂系数对 MMC 电压稳定性影响频域分析

下面在频域中考虑下垂系数对 MMC 直流侧电压稳定性的影响。由文献[27]可知, 系统的相角裕量与阻尼系数存在如式(14)所示的关系。

$$PM = \text{atan} \left(\frac{2\zeta}{\sqrt{\sqrt{1+4\zeta^4} - 2\zeta^2}} \right) \quad (14)$$

对式(14)进行计算, 可以得到

$$\zeta = \sqrt[4]{\frac{\tan^4 PM}{16 \tan^2 PM + 16}} \quad (15)$$

根据式(15)可以得到相角裕度与阻尼系数间关系的曲线, 如图 6 所示。可以看出相角裕度与阻尼系数呈正相关的关系, 因此, 在频域下考察系统阻尼情况时, 可以取相角裕度作为参考。另外, 系统的带宽表征了系统跟踪正弦输入信号的能力, 可以

作为频域下考察系统暂态响应速度的指标。

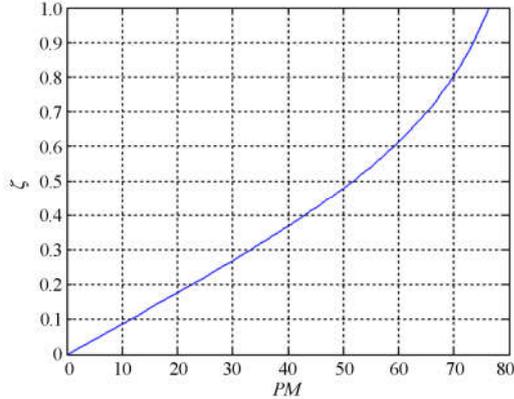


图 6 系统相角裕量与阻尼系数间关系曲线

Fig. 6 Curve of relationship between system phase margin and damping factor

对于前文所列参数的 MMC，当下垂系数取 0.1 时，直流侧电压的开环、闭环幅频特性如图 7 所示，此时系统的相角裕量为 37.6° ，闭环带宽为 16.02 rad/sec 。

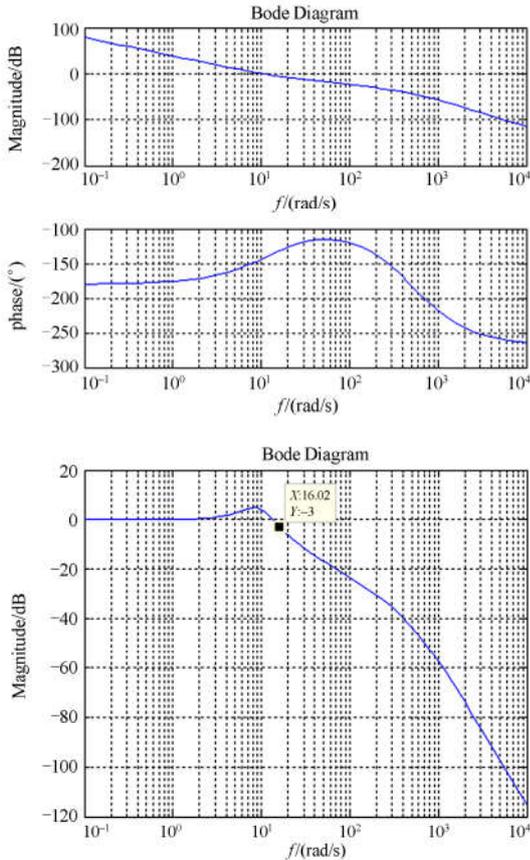


图 7 MMC 直流电压幅频特性

Fig. 7 MMC DC voltage frequency response

如图 8 所示，依次给定下垂系数以不同的数值，

得到相应的 MMC 直流电压控制系统的相角裕度 PM 和带宽截止频率 ω_b ，进而判断其对直流电网动态电压稳定性的影响。

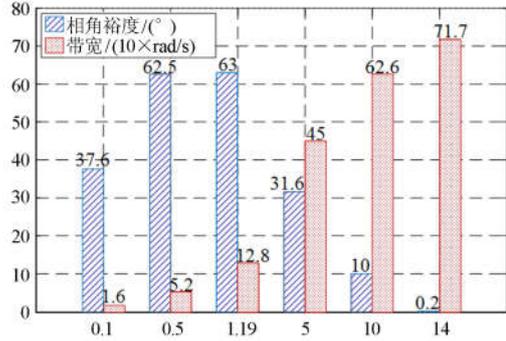


图 8 不同下垂系数下直流电压控制系统频域特性

Fig. 8 Frequency domain characteristic with different droop coefficients

由式(4)可知，对于一个桥臂电感确定的 MMC，其动态电压特性主要由子模块电容电压及其直流侧电流决定。从图 8 中可以看出，当 $0 < D \leq 1.19$ 时，MMC 直流电压控制系统的相角裕度始终维持在较高的水平，说明系统阻尼较大。同时，随着下垂系数的增大，系统的带宽逐渐增加，提高了直流电网交流侧电流的响应速度，可以快速地补偿子模块电容上充放电电流的不平衡，从而减小子模块电容电压出现的波动，确保直流电网具备良好的动态电压稳定性。而当 $1.19 < D < 14$ 时，随着下垂系数的增大，系统的相角裕度逐渐减小，说明系统阻尼在不断减小，带宽持续增大，但过高的带宽将导致直流电网直流侧电流的响应速度过快，从而导致换流器桥臂电抗端电压出现较大变化，造成直流电网的动态电压稳定性下降。

3 仿真分析

3.1 仿真模型

在 PSCAD/EMTDC 中建立了如图 9 所示的 4 端直流电网系统模型，各站换流器均为 MMC 且各项参数完全一致，主要参数如表 1 所示。站级控制策略均采用直接电流控制，换流站 4 的系统级控制

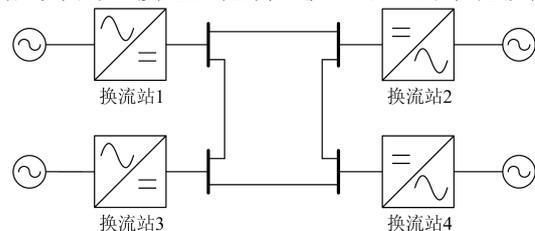


图 9 4 端直流电网拓扑结构

Fig. 9 Four-terminal DC grid topology

策略采用定直流电压控制, 其余换流站则采用直流电压下垂控制, 各换流站在控制上的主要差别在于是否采用下垂控制。仿真过程中, 为简化仿真分析, 设定 3 个下垂控制站的下垂系数相同。

3.2 稳态运行仿真分析

当此直流电网系统中无功功率传输时, 各换流站直流侧电压均为直流母线额定电压; 在 0.6 s 时, 给定换流站 1 的有功功率参考值为 -0.3 p.u., 换流站 2 的有功功率参考值为 0.2 p.u., 换流站 3 的有功功率参考值为 -0.8 p.u.; 在 1.0 s 时, 将换流站 3 的有功功率参考值设定为 0.4 p.u.; 依次在不同的取值区间内选取下垂系数对以上过程进行仿真, 换流站 1 直流侧的电压波形如图 10 所示。

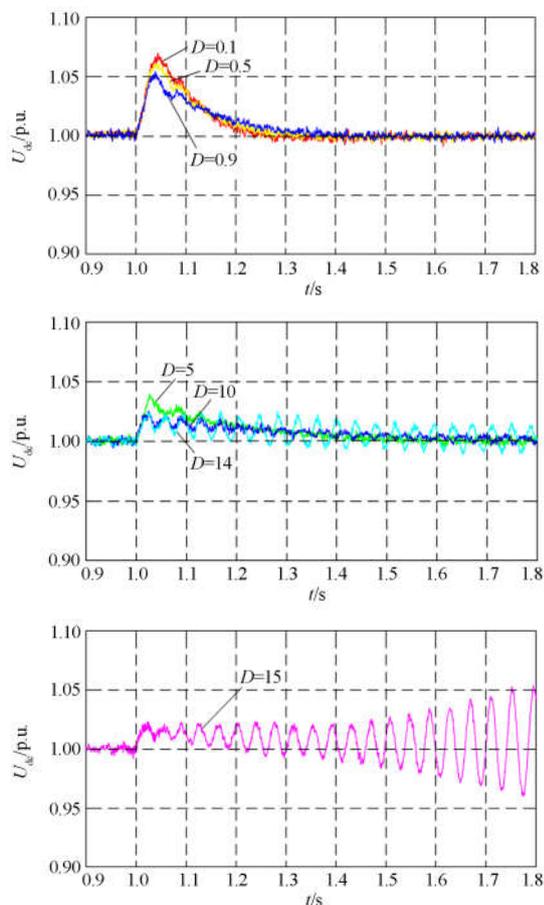


图 10 稳态时不同下垂系数下换流站 1 直流电压
Fig. 10 DC voltage of converter station 1 with different droop coefficients on steady state

由图 10 可知, 直流电网发生功率阶跃时, 系统直流电压将会迅速升高。当在零至分离点的区间内选取下垂系数时, 系统直流电压在短暂的升高后将逐渐恢复稳定, 直流系统将过渡到新的稳态; 当在分离点到最大上限的区间内选取下垂系数时, 虽

然最终可以达到稳态, 但直流电压的稳定性相对较差; 当在最大上限到无穷的区间内选取下垂系数时, 系统直流电压将呈发散振荡, 无法恢复稳定, 与前文的分析一致。

3.3 换流站退出运行仿真分析

直流电网安全运行时应满足 $N-1$ 原则, 因此需要考虑在有换流站退出运行的工况下下垂系数对直流系统电压暂态稳定性的影响。稳态运行时, 给定换流站 1 的有功功率参考值为 0.3 p.u., 换流站 2 的有功功率参考值为 -0.3 p.u., 换流站 3 的有功功率参考值为 0.8 p.u.; 1.0 s 时令换流站 3 退出运行, 依次在不同的取值区间内选取下垂系数对以上过程进行仿真, 得到换流站 1 直流侧电压波形如图 11 所示。

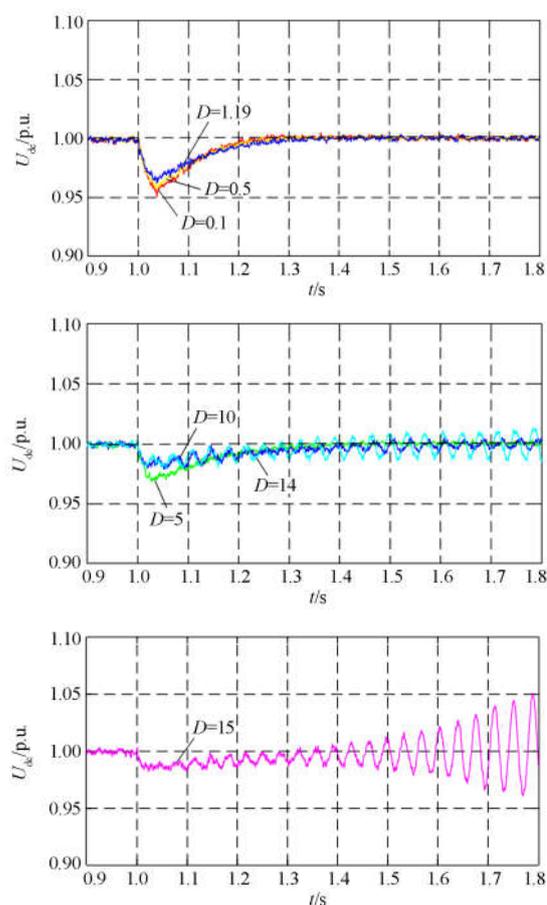


图 11 换流站 3 退出运行时不同下垂系数下换流站 1 直流电压
Fig. 11 DC voltage of converter station 1 with different droop coefficients after converter station 3 quitting out

由图 11 可以看出, 在有换流器因故退出运行的情况下, 前文的分析方法依然适用。当直流电网中有换流站退出运行时, 系统功率将出现差额, 进而导致系统的直流电压迅速下降。在不同的取值区间选取下垂系数将令直流电压控制系统的阻尼状态及

暂态响应水平产生不同的变化, 从而影响系统直流侧电压的动态稳定性。

4 结论

本文建立了下垂控制作用下 MMC 直流侧电压控制系统模型和其传递函数, 采用劳斯判据确定了能够保持系统直流电压稳定的下垂系数取值范围。同时, 通过在时域及频域下的分析, 研究了在不同取值区间内选取下垂系数对直流电网动态电压稳定性的影响。当下垂系数小于系统根轨迹的分离点时, 系统相角裕度较大, 处于过阻尼状态, 且随着下垂系数的增大, 系统的带宽逐渐增加, 暂态响应速度较快, 直流电网的动态电压稳定性较强; 当下垂系数超过分离点后, 系统相角裕度逐渐减小, 将进入欠阻尼状态, 随着下垂系数的增大, 系统的带宽持续增加, 直流电网的动态电压稳定性有所下降; 当下垂系数超过本文所给的理论计算范围的最大值时, 系统将进入负阻尼状态, 将会导致系统直流电压失稳。

参考文献

- [1] 张丽英, 叶廷路, 辛耀中, 等. 大规模风电接入电网的相关问题及措施[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(25): 1-9.
ZHANG Liying, YE Tinglu, XIN Yaozhong, et al. Problems and measures of power grid accommodating large scale wind power[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(25): 1-9.
- [2] 温家良, 吴锐, 彭畅, 等. 直流电网在中国的应用前景分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(13): 7-12.
WEN Jialiang, WU Rui, PENG Chang, et al. Analysis of DC grid prospects in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(13): 7-12.
- [3] 汤广福, 罗湘, 魏晓光. 多端直流输电与直流电网技术[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 8-17.
TANG Guangfu, LUO Xiang, WEI Xiaoguang. Multi-terminal HVDC and DC-grid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 8-17.
- [4] TANG Guangfu, HE Zhiyuan, PANG Hui. R&D and application of voltage sourced converter based high voltage direct current engineering technology in China[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2014, 2(1): 1-15.
- [5] 姚美齐, 李乃湖. 欧洲超级电网的发展及其解决方案[J]. 电网技术, 2014, 38(3): 549-555.
YAO Meiqi, LI Naihu. An introduction to European supergrid and its solutions[J]. Power System Technology, 2014, 38(3): 549-555.
- [6] CIGRE B4-52 Working Group. HVDC grid feasibility study[R]. Melbourne: International Council on Large Electric Systems, 2011.
- [7] 洪莎莎, 武迪, 吕宏水, 等. 基于高阶系统模型的 VSC-MTDC 下垂控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(22): 125-131.
HONG Shasha, WU Di, LÜ Hongshui, et al. Droop control strategy research of VSC-MTDC based on high-order system model[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(22): 125-131.
- [8] 曹乐萌, 赵巧娥, 高金城, 等. HVDC 系统中 MMC 换流器控制策略研究[J]. 智慧电力, 2017, 45(10): 31-36.
CAO Lemeng, ZHAO Qiaoe, GAO Jincheng, et al. Research on control strategy for MMC converter in HVDC System[J]. Smart Power, 2017, 45(10): 31-36.
- [9] 黄强, 陈亮, 袁晓冬, 等. 多端直流配电系统工程仿真分析及示范应用[J]. 供用电, 2018, 35(6): 24-32.
HUANG Qiang, CHEN Liang, YUAN Xiaodong, et al. Multi-terminal DC distribution system engineering simulation analysis and demonstration application[J]. Distribution & Utilization, 2018, 35(6): 24-32.
- [10] 李国庆, 孙银锋, 吴学光. 柔性直流输电稳定性分析及控制参数整定[J]. 电工技术学报, 2017, 32(6): 231-239.
LI Guoqing, SUN Yinfeng, WU Xueguang. VSC-HVDC stability analysis and control parameter setting[J]. Transactions of China Electrotechnical society, 2017, 32(6): 231-239.
- [11] 韩民晓, 翟冬玲, 唐晓骏. 连接低惯量系统的柔性直流输电模型预测控制[J]. 电工技术学报, 2017, 32(22): 198-206.
HAN Minxiao, ZHAI Dongling, TANG Xiaojun. Model predictive control of voltage source converter-HVDC connected to low inertia system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(22): 198-206.
- [12] 张天, 龚雁峰. 特高压交直流电网输电技术及运行特性综述[J]. 智慧电力, 2018, 46(2): 87-92.
ZHANG Tian, GONG Yanfeng. Research on transmission technologies and operational performance of UHV AC/DC power grid in China[J]. Smart Power, 2018, 46(2): 87-92.
- [13] 王柯, 李继红, 田杰, 等. 多端柔性直流故障快速恢复系统控制策略[J]. 供用电, 2017, 34(8): 2-7.
WANG Ke, LI Jihong, TIAN Jie, et al. Control strategy of quick recovery system with multi-terminals HVDC DC fault[J]. Distribution & Utilization, 2017, 34(8): 2-7.
- [14] 徐进, 金逸, 胡从川, 等. 适用于海上风电并网的多端柔性直流系统自适应下垂控制研究[J]. 电力系统保护

- 与控制, 2018, 46(4): 78-85.
- XU Jin, JIN Yi, HU Congchuan, et al. DC voltage adaptive droop control of multi-terminal VSC-HVDC system for offshore wind farms integration[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(4): 78-85.
- [15] 吴杰, 王志新. 多端柔性直流输电系统的改进下垂控制策略[J]. 电工技术学报, 2017, 32(20): 241-250.
- WU Jie, WANG Zhixin. Improved droop control strategy for multi-terminal voltage source converter-HVDC[J]. Transactions of China Electrotechnical society, 2017, 32(20): 241-250.
- [16] BEERTEN J, BELMANS R. Analysis of power sharing and voltage deviations in droop-controlled DC grids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 4588-4597.
- [17] ABDEL-KHALIK A, MASSOUD A, ELSEROUGI A, et al. Optimum power transmission-based droop control design for multi-terminal HVDC of offshore wind farms[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 3401-3409.
- [18] 阎发友, 汤广福, 贺之渊, 等. 基于 MMC 的多端柔性直流输电系统改进下垂控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(3): 397-404.
- YAN Fayou, TANG Guangfu, HE Zhiyuan, et al. An improved droop control strategy for MMC-based VSC-MTDC systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(3): 397-404.
- [19] 韩民晓, 熊凌飞, 丁辉. 利用电压斜率控制的 VSC-MTDC 稳定性分析[J]. 电网技术, 2015, 39(7): 1808-1813.
- HAN Minxiao, XIONG Lingfei, DING Hui. Stability analysis of VSC-MTDC with voltage droop control[J]. Power System Technology, 2015, 39(7): 1808-1813.
- [20] 刘盼盼, 荆龙, 吴学智, 等. 一种 MMC-MTDC 系统新型协调控制策略[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 64-69.
- LIU Panpan, JING Long, WU Xuezhi, et al. A new coordinated control strategy for MMC-MTDC system and stability analysis[J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 64-69.
- [21] 刘宁宁, 曹炜, 赵晋斌. 直流微电网的一种增量式下垂控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(8): 24-30.
- LIU Ningning, CAO Wei, ZHAO Jinbin. An incremental droop control method for DC micro-grid[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(8): 24-30.
- [22] TAO Fen, XIE Zhujun, CHENG Jie, et al. Fast valve power loss evaluation method for modular multi-level converter operating at high-frequency[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 26-36. DOI: 10.1186/s41601-016-0015-z.
- [23] 徐政, 屠卿瑞, 管敏渊, 等. 柔性直流输电系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012: 28-32.
- [24] 胡静. 基于 MMC 的多端直流输电系统控制方法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2013: 48-51.
- HU Jing. Research on control method for multi-terminal DC transmission system based on MMC[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2013: 48-51.
- [25] 赵岩, 胡学浩, 汤广福, 等. 模块化多电平变流器 HVDC 输电系统控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(25): 35-42.
- ZHAO Yan, HU Xuehao, TANG Guangfu, et al. Control strategy of modular multilevel converters based HVDC transmission[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(25): 35-42.
- [26] 王孝武, 方敏, 葛锁良. 自动控制理论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009: 75-82.
- [27] 赵岩. 基于模块化多电平电压源型变流器的动态特性及其控制策略研究[D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2010: 36-38.
- ZHAO Yan. Research on dynamic characteristics and control strategies of modular multilevel converters[D]. Beijing: China Electric Power Research Institute, 2010: 36-38.

收稿日期: 2018-05-21; 修回日期: 2018-10-22

作者简介:

吴蒙(1992—), 男, 硕士, 研究方向为直流电网协调控制策略; E-mail: wumeng@ncepu.edu.cn

贺之渊(1977—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 研究方向为 FACTS、HVDC 及其相关试验方法。

(编辑 许威)